

自由対流中の気温変動の標準偏差について

佐 橋 謙*・米 谷 俊 彦

緒 言

作物の生育する接地気層中での熱輸送は、乱流によるものが重要な部分を占めており、作物群落上での乱流による物理量の輸送の定量的扱い(例えば Seo et al, 1974), 乱流そのものの構造やそれが群落に与える影響の研究(例えば米谷, 1981, 1985)など数多い。このような乱流を特徴づける基本的な量は次のように定義されるいわゆる変動量 x' である。

$$x' = x - \bar{x}$$

ここで \bar{x} はいま問題にする物理量の時間平均値、 x はその瞬間値である。このような乱流についての変動量は統計的にしか取り扱うことができない。これらの統計量のうちで最も単純ではあるが最も基本的な量は標準偏差である。

接地気層中の気温変動の標準偏差については熱対流による乱流輸送の卓越する不安定大気中で高度の $-1/3$ 乗に比例することが理論的に示されている。また、理論的には決められない比例定数の値についても、観測結果を利用して値が求められている。しかし、温度環境やスケールの異なる場合に接地気層で得られた関係式をそのまま適用できるかどうかについては十分に吟味しておくことが必要である。ここでは熱板上で模型実験を行い、すでに得られている接地気層中での理論式が、小規模な場合にも適合するかどうかを検討し、さらに理論式を変形して、自由対流が卓越する場合の熱輸送量を簡単に評価できる方式を示す。これは例えば静穏大気中で日射を受けて暖まった葉面からの熱輸送量や、閉じた温室中での、地表面から空気に与えられる熱輸送量を評価するような時にも適用できると考えられる。

岡山大学農業生物研究所に御在任中、終始筆者らを励まされ、種々の御好意を頂いた名誉教授瀬尾琢郎博士に深く感謝する。また、測定と岡山大学情報処理センターでのデータ処理に尽力した千種典子氏にも謝意を表する。

実 験 方 法

1. 熱板の構造と特性

模型実験用の熱板は、表面の大きさが $38\text{ cm} \times 33\text{ cm}$ 、厚さ 0.3 mm のクロームメッキ銅板を使用した。この銅板を深さ 9.5 cm の鉄板製の箱の上に蓋のように載せ、その箱の中の空洞部分の半分の高さに4列に合計 300 W のコイル状ニクロム線を並べ、ヒーターとして使用して蓋にあたる銅板を熱するようにした。今回の目的からすると、サンプリング

昭和61年1月8日受理

* 岡山大学教育学部

時間中（おおよそ20分間）にはあまり大きな表面温度の変化のないことが望ましい、この状態でニクロム線に通電して熱板の表面温度を実測したところ、4分間の間に温度変化が30°Cにもなり、我々の目的にはこのままで使用できそうにない。

このような熱板の急激な変化は、熱容量が小さいことがその大きな理由と考えられるので、鉄板製の箱の中に砂を詰め、ニクロム線は砂の中に埋めた形にし、砂の上面にはろう石かすを厚さ約3 mmに敷きつめ、表面の銅板との接触を良くするようにして熱容量を大きくした。このようにして前と同様銅板の表面温度を測定したところ、表面温度の時間変化量は前の場合と比べて大幅に小さくなっており、30分で約30°Cとなり、また通電後1時間経過したあとではそれは30分で約5°Cであった。

今回の実験では、この程度の表面温度の時間変化は許されると考え、この熱板を実験に使用することにした。また、熱板の温度制御には電源にスライダックを挿入し、電圧を変化させることによって熱板の表面温度を変えることにした。

2. 温度計

今回の実験では空間的にあまり大きくない場所での温度の微小変動を測定せねばならないのだから、温度計の特性としては、幾何学的形状の小さいこと、時定数の小さいことが要求される。この両方を満たすものの1つに熱電対温度計があり、今回は銅-コンスタンタンで感部の直径が0.18 mmのものを使用した。この大きさで、時定数は気流流速0.5 m/sのもとで約1秒である。

3. 測定

上記熱電対温度計による測定高度は、熱板表面、熱板上17, 25, 42及び80 mmの5高度で熱板の対角線の交点の直上に鉛直方向に並べた。測定器機のブロック図をFig. 1に

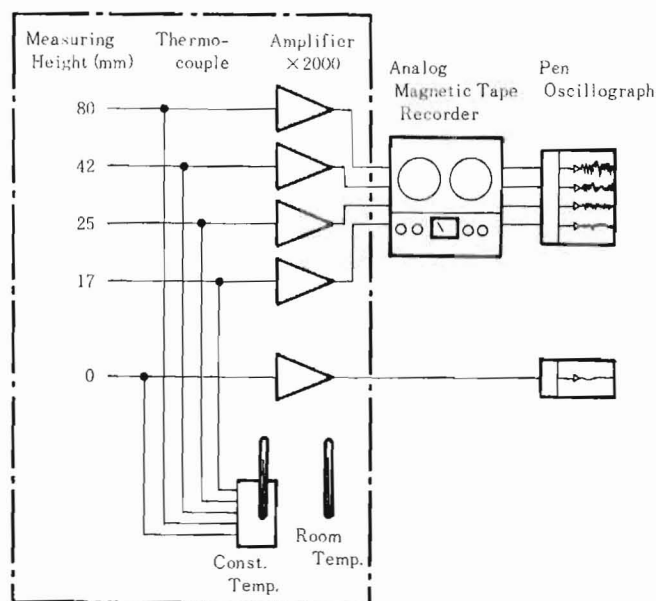


Fig. 1. Block diagram of the experiment.

示す。同図の鎖線の内側のみを 実験室 (3 m×6.5 m) 内に置き、他の部分は室外に 置いた。熱板は実験室内の高さ 75 cm の台上に設置し、強制対流の影響を無くすため、部室の窓、扉は閉じ、測定中は実験室に立ち入らないようにした。室温測定用温度計はアスマン通風温度計を使用し、測定開始直前に読取った。

Fig. 1 中の 4 要素ペンレコーダはモニタ用で、解析には磁気テープレコーダに記録したものを使用し、テープ速度は毎秒 $3\frac{3}{4}$ インチとした。1 回の 観測時間は 20 分間である。熱板の表面温度は 1 要素ペンレコーダに記録し、20 分間の平均値を使用した。

解 析

磁気テープレコーダに 記録されたアナログ信号は岡山大学総合情報処理センターの LA サブシステムによって 200 Hz のサンプル周波数でデジタル信号とし、それを同センターの ACOS システム 1000 によって標準偏差を得た。一連の操作のソフトは 桑本 (1984) によって開発されたものである。最終的には 13 回の観測について 4 高度ずつ合計 52 個の 20 分間の観測資料について、10 Hz のサンプル間隔で標準偏差を求めた。その結果を、各観測についての熱板表面温度と室温との差と共に、Table 1 に示す。

さて、接地気層中で自由対流が卓越する時に、気温の標準偏差 σ_T の高度分布は、

$$\sigma_T = A_T \bar{q}^{\frac{2}{3}} \beta^{-\frac{1}{3}} (kz)^{-\frac{1}{3}} \dots\dots\dots (1)$$

であることが、次元解析から導かれている (例えば Panchev, 1971)。ここで \bar{q} は自由対流による顕熱輸送量を空気の比熱 C_p と密度 ρ の積 $C_p \rho$ で除したもの、 β は g/T_0 、 k はカルマン常数、 g は重力加速度、 T_0 はその気層の 平均温度であり、 A_T は無次元の 常数

Table 1. Standard deviation of the temperature fluctuation above the hot plate in deg. C. $\theta_0-\theta_\infty$ means the difference between the surface temperature and the room temperature.

Run No.	$\theta_0-\theta_\infty$	Height			
		80 mm	42 mm	25 mm	17 mm
1	10.0°C	0.7532	0.8487	0.7372	0.6600
2	16.9	1.146	1.356	1.521	1.715
3	18.3	1.029	1.124	1.840	2.487
4	23.7	1.155	1.409	1.683	2.069
5	25.2	1.173	1.399	1.563	2.082
6	29.3	1.637	1.562	1.904	2.294
7	34.7	1.399	1.781	2.126	2.529
8	39.5	1.498	2.057	2.443	2.938
9	46.2	1.914	1.985	2.549	3.215
10	49.5	1.844	2.554	3.122	3.733
11	50.6	2.676	3.656	1.989	2.185
12	52.8	4.141	4.451	2.066	2.423
13	57.6	2.034	2.473	3.125	3.901

であって Perepelkina (1962) は地上 0.1, 1.5, 1.9, 4.0 m の実測値を整理して 0.815 という値を得ている。以下の考察では、我々の得た熱板上での σ_T の値が (1) 式のように $z^{-\frac{1}{3}}$ に比例し、かつその係数が熱輸送量に依存して変化しているかどうかを検討する。

考 察

我々の得た Table 1 の結果が、 $z^{-\frac{1}{3}}$ に比例しているかどうかを調べるためには、両対数グラフ上で、一方の軸（例えば縦軸）に高度 z をとり、横軸に σ_T をとって Table 1 の値をプロットしてその勾配を見れば良い。しかし (1) 式から考えて、ある高度の σ_T の値でその時の Run の各高度の σ_T の値を規格化した方が全部の測定の結果を 1 本の直線で表わせることになり、好都合である。そこで各 Run ごとに高度 80 mm の σ_T の値で規格化し、さらに各高度の規格化された値の標準偏差値が、その高度での規格化された値の平均の 10% 以内におさまるように、 σ_T の規格化された値が他の Run の同じ高度でのそれと大きくずれているものを除外すると、Run 1 から 13 までの測定のうち、Run 1, 3, 6, 11, 12 の計 5 回が除外され、残りの 8 個の Run についてプロットすると、Fig. 2 が得られた。Fig. 2 にある実線は、 $z^{-\frac{1}{3}}$ の理論値で実測から得られた値との一致はまず良好と言えよう。実際、Fig. 2 に使用した 8 個の Run について、規格化した各高度の標準偏差の平均値と、 $z^{-\frac{1}{3}}$ に従うとした時の各高度の理論値を Table 2 に示すが、両者の一致は十分である。

次に (1) 式で表現されている、気温の標準偏差の高度分布の勾配が、熱輸送量の関数になっているかどうかを、我々の実測値について検討する。(1) 式中の \bar{q} は自由対流による熱輸送量を C_{pp} で除したものであるから、 θ_0 を表面温度、 θ_∞ を表面から十分離れたところの気温とすると、

$$\bar{q} = \frac{C_1}{C_{pp}} (\theta_0 - \theta_\infty) \dots \dots \dots (2)$$

と書ける。ここで C_1 は自由対流による熱輸送量が表面温度と、表面から十分離れたところの気温との差に比例するとした時の比例定数である。また (1) 式中の β は g/T_0 であるが、ここで T_0 を近似的に、

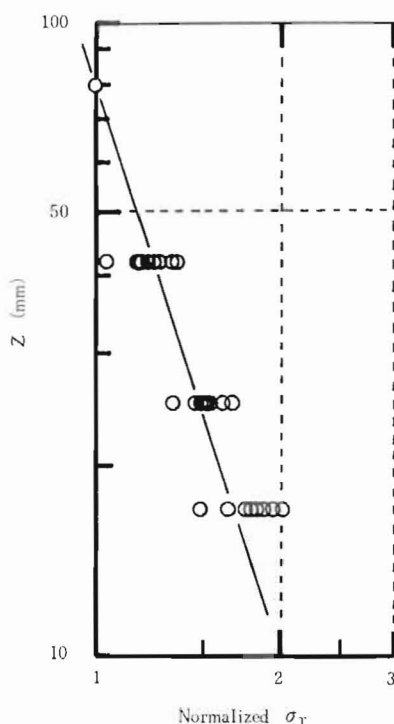


Fig. 2. Height dependency of normalized standard deviation of the air temperature fluctuation.

Table 2. Normalized standard deviation of temperature fluctuation.

Run No.	Height			
	80mm	42 mm	25 mm	17 mm
2	1.00	1.18	1.33	1.50
4	1.00	1.22	1.46	1.79
5	1.00	1.19	1.33	1.77
7	1.00	1.27	1.52	1.81
8	1.00	1.37	1.63	1.96
9	1.00	1.04	1.33	1.68
10	1.00	1.39	1.69	2.02
13	1.00	1.22	1.54	1.92
Mean	1.00	1.24	1.48	1.81
S. D.	—	0.104	0.134	0.158
Theor. Value		1.24	1.47	1.68

$$T_o \approx \frac{1}{2} (\theta_o - \theta_\infty) + 273$$

$$\approx 300 \text{ [K]} \dots\dots\dots (3)$$

と書く。これは $\theta_o - \theta_\infty$ を 54°C とし、その多少の変化を 273 に対して無視したのと同等である。(2)(3)を(1)に代入し、(1)式中の Ar の値に前述の Perepelkina の値を使うと、

$$\sigma_T = 174 \{C_1(\theta_o - \theta_\infty)\}^{\frac{2}{3}} z^{-\frac{1}{3}} \text{ [}^\circ\text{C]} \dots\dots\dots (4)$$

従って、 $z^{-\frac{1}{3}}$ に対して σ_T をプロットすればその勾配は $\theta_o - \theta_\infty$ が大きい程大きくなる筈である。前述の σ_T が $z^{-\frac{1}{3}}$ に比例することを述べるのに使用した 8 個の Run について、横軸に $z^{-\frac{1}{3}}$ を、縦軸に σ_T をとってプロットすると、Fig. 3 が得られた。Fig. 3 の線のそばの数字は Table 1 の Run No. と同じである。図で容易にわかるように番号が大きいほど傾きが大きくなっている。いま θ_∞ として室温をとることにすると、この図中の番号は Table 1 で示されているとおり $\theta_o - \theta_\infty$ の小さな順につけられているから $z^{-\frac{1}{3}}$ に対する σ_T の傾きが $\theta_o - \theta_\infty$ の関数であって、しかも、その傾きは $\theta_o - \theta_\infty$ の増加と共に増大していることが示されている。いま、Fig. 3 に示した 8 個の Run について最小 2 乗法によって回帰直線を定め、その勾配を $\theta_o - \theta_\infty$ に対してプロットすると、Fig. 4 のようになった。

Fig. 4 中の実線はプロットされた点を最も良く通るように決めた $(\theta_o - \theta_\infty)^{\frac{2}{3}}$ の線である。この実線がこのように実測から得られた点を結ぶ線に近いということは、(4) 式の C_1 が $\theta_o - \theta_\infty$ にかかわらず一定であることを示唆している。この C_1 が求められればまた(2)式によって自由対流の卓越する時の熱輸送量が、表面温度と、表面から十分高い所との温度差の測定だけで求め得ることにもなる。この C_1 を求めるには(4)式と Fig. 3 ま

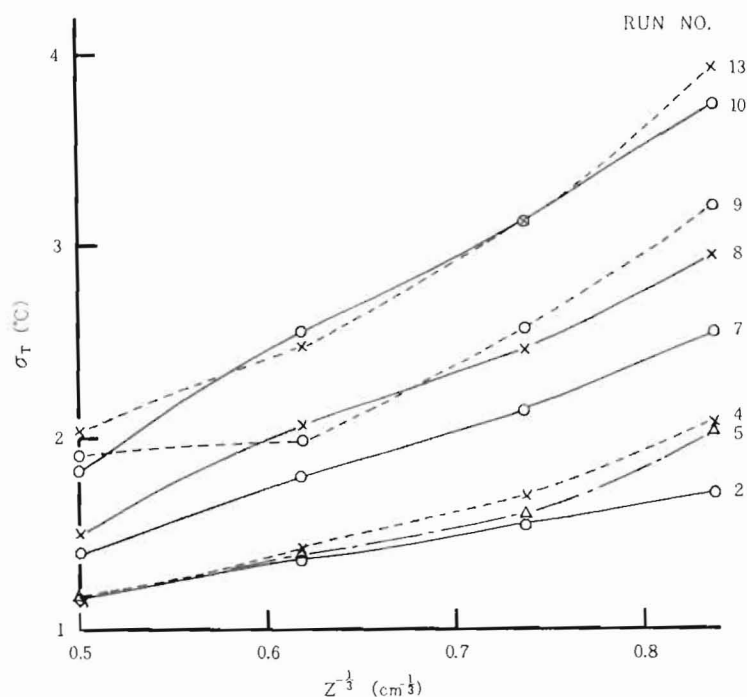


Fig. 3. Relation between standard deviation of the air temperature fluctuation and $z^{-1/3}$.

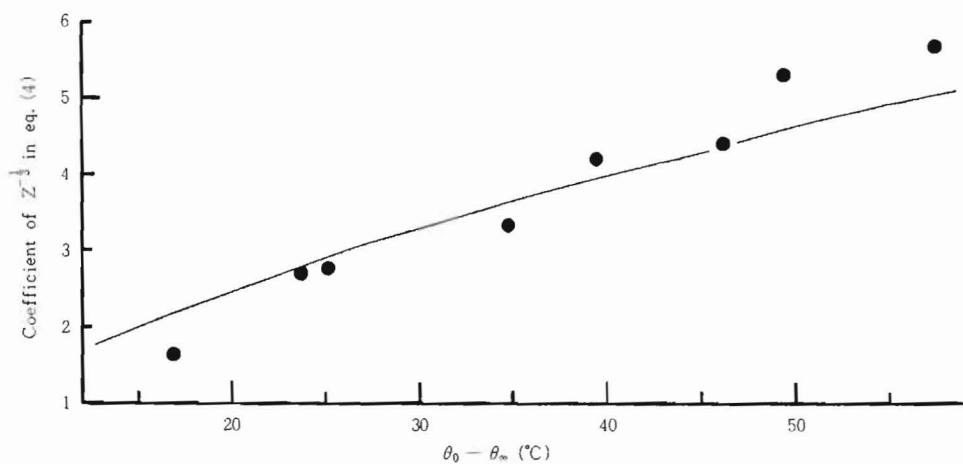


Fig. 4. Relation between the coefficient of $z^{-1/3}$ in equation (4) and $\theta_0 - \theta_\infty$.
Solid line shows theoretical value obtained with equation (4).

たは Fig. 4 が利用できる。すなわち Fig. 3 の勾配または Fig. 4 の縦軸の値は (4) 式の右辺の $z^{-1/3}$ の係数に等しいから、(4) 式によって C_1 を求められる。Fig. 3 によって回歸直線を求め、 C_1 を計算した結果とその標準誤差を Table 3 に示す。従って C_1 の結果は

Table 3. Values and standard error of C_1 .

Run No.	C_1	Standard Error of C_1
2	5.42×10^{-5}	4.09×10^{-7}
4	9.35×10^{-5}	1.75×10^{-5}
5	6.96×10^{-5}	7.11×10^{-6}
7	7.53×10^{-5}	7.00×10^{-7}
8	9.39×10^{-5}	1.07×10^{-5}
9	7.24×10^{-5}	8.84×10^{-6}
10	1.14×10^{-4}	5.17×10^{-7}
13	9.78×10^{-5}	3.68×10^{-6}
Mean	8.38×10^{-5}	4.97×10^{-6}

$$C_1 = 8.38 \times 10^{-5} \pm 0.50 \times 10^{-5} [\text{cal} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{sec}^{-1} \cdot (^\circ\text{C})^{-1}] \dots \dots \dots (5)$$

と書ける. この C_1 を (2) 式に適用することによって, 自由対流の卓越する時の熱輸送量を評価することが可能となる. 例えば, 地表温度と, 地表から十分離れた 5 m 高度くらいとの温度差が 30°C の時, 自由対流による熱輸送量は上記の C_1 を使用すると $0.15 \text{ cal cm}^{-2} \text{ min}^{-1}$ となる. これを確認するためには, 接地気層中での熱輸送量の直接測定値, 5 m 程度の高さでの気温と地表温度の同時測定の資料があれば良いが, 現在筆者等の手元にそれらがなく, 将来の問題として残るところである.

摘 要

38 cm × 33 cm の大きさの熱板上 1.7, 2.5, 4.2 及び 8.0 cm 高度での気温の標準偏差の高度分布が, 次元解析による理論式と一致して $z^{1/3}$ に比例することを確認, さらに自由対流の卓越する時の熱輸送量 (q) は, 表面温度 (θ_0) と表面から十分離れた所での気温 (θ_∞) との差に比例するとした時の比例常数, 即ち

$$q = C_1 (\theta_0 - \theta_\infty)$$

と書いた時の C_1 の値を求めた. これは例えば, 葉面や温室中の地表面からの熱輸送の評価などに有用と思われる.

文 献

- 桑本祐介, 1984. 岡山大学総合情報処理センターの LA システムによる海風中の乱れの統計量の計算. 岡山大学大学院教育学専攻修士論文.
- 米谷俊彦, 1981. 小型の台風7912号通過時の倉敷における水稲のゆれの観測. 農業気象, 36, 251-255.
- Maitani, T. 1985. Vertical transport of scalar quantities within and above paddy field. Boundary. Layer Meteor. 33, 197-208.
- Panchev, S. 1971. Random functions and turbulence. Pergamon Press, N.Y. 284.
- Perepelkina, A. V. 1962. On the characteristics of turbulence in the atmosphere's

surface layer under the free convection. Izv. Acad. Sci. USSR, Geophys. Ser. No. 2. 271-274.

Seo, T. and E. Ohtaki. 1974. Atmospheric flux of carbon dioxide over paddy fields estimated by heat balance approach. Ber. Ohara Inst. landw. Biol. Okayama Univ. 16. 79-92.

On the Standard Deviation of the Air Temperature Fluctuation in the Free Convection Regime

Ken SAHASHI and Toshihiko MAITANI

Summary

A dimensional analysis predicts that under the free convection, the vertical distribution of air temperature fluctuation (σ_T) follows the equation $\sigma_T \propto z^{-\frac{1}{3}}$ in the air layer near the surface, where z is the observation height. In the present paper, the validity of equation was confirmed in the air layer of depth 80 mm on a hot plate (38 cm \times 33 cm).

With the assumption that the heat flux (\tilde{q}) under free convection regime is proportional to the temperature difference ($\theta_0 - \theta_\infty$) between surface and the air, the proportional constant C_1 in equation $\tilde{q} = \frac{C_1}{\rho p} (\theta_0 - \theta_\infty)$ was determined.

The obtained value of the constant was:

$$C_1 = 8.35 \times 10^{-5} + 0.50 \times 10^{-5} [\text{cal} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{sec}^{-1} \cdot (^\circ\text{C})^{-1}]$$

By using C_1 , we can estimate the sensible heat flux with the temperature difference between the surface and the air which is sufficiently apart from the ground, say 5 m.